喷施吲哚-3-乙酸（IAA）对番茄及其上 B 型烟粉虱的影响

邱 宁[1,#]，张献忠[2,#]，张 凯[1]，张世泽[1]，刘同先[1,*]

（1. 西北农林科技大学，西北旱区作物逆境生物学国家重点实验室，农业部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室，陕西杨凌 712100；2. 山东淄博高青农业局，山东淄博 256300）

摘要：【目的】不同植物生长调节物质对植食性昆虫产卵、发育、取食等常有促进或抑制作用，进而影响植物与昆虫的互作关系。本研究旨在阐明常用的植物生长调节剂吲哚-3-乙酸对 B 型烟粉虱 *Bemisia tabaci*（Gennadius）的影响，进而探索防治烟粉虱环境友好的方法，同时期望获得更加优质的烟粉虱用作替代寄主饲养寄生蜂。【方法】对番茄 *Solanum lycopersicum* L. 植株外源喷施吲哚-3-乙酸（IAA），检测其生理生化的响应；记录 B 型烟粉虱存活率、产卵量并测量解毒酶等指标。【结果】喷施 IAA 后番茄叶片含水量略有上升，叶面积增大，叶绿素含量增加，过氧化物酶（POD）活性降低，多酚氧化酶（PPO）活性升高，超氧化物歧化酶（SOD）活性变化不显著（$P>0.05$）。喷施 IAA 后番茄上 B 型烟粉虱成虫存活率高于对照组，其中 50 mg/L IAA 番茄上 B 型烟粉虱成虫存活率和总产卵量最高，250 mg/L IAA 存活率最低；喷施 IAA 120 h 后烟粉虱总产卵量升高；碱性磷酸酶（AKP）、超氧化物歧化酶（SOD）活性较对照升高。【结论】喷施不同浓度的 IAA 溶液后，番茄植株的生理生化水平发生不同程度的改变，烟粉虱成虫的存活状况、产卵量以及体内解毒活性也会产生不同程度的改变。适宜剂量的 IAA 处理能够使烟粉虱的生存表现更加优异，从而为饲养寄生蜂提供优质的替代寄主。

关键词：B 型烟粉虱；吲哚-3-乙酸（IAA）；番茄；解毒酶；存活率；产卵

中图分类号：Q968　**文献标识码**：A　**文章编号**：0454-6296(2014)07-0824-07

Influences of indole-3-acetic acid (IAA) spraying on *Solanum lycopersicum* plants and the infesting *Bemisia tabaci* (Gennadius) biotype B (Hemiptera: Aleyrodidae) whiteflies

DI Ning[1,#], ZHANG Xian-Zhong[2,#], ZHANG Kai[1], ZHANG Shi-Ze[1], LIU Tong-Xian[1,*] (State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas, and Key Laboratory of Northwest Loess Plateau Crop Pest Management of Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Agricultural Bureau of Gaoqing, Zibo, Shangdong 256300, China)

Abstract: 【Aim】 Different plant growth regulators could either facilitate or inhibit herbivores' oviposition behavior, development and foraging, thus affecting the relationship between insects and their host plants. By detecting the potential effects of the widely used plant growth regulator indo-3-acetic acid (IAA) on *Bemisia tabaci* (Gennadius) biotype B, we aim to find out environmentally-friendly methods to whitefly management and hope to rear better whiteflies as alternative host of parasitoids. 【Methods】 We sprayed IAA on tomato *Solanum lycopersicum* L. seedlings, and then measured the physiological indexes of tomato leaves and the influences of IAA on the survival, oviposition and detoxification enzyme activities of *B. tabaci* adults. 【Results】 After application of IAA, the water content, leaf area, polyphenol oxidase (PPO) activity and chlorophyll concentration in tomato leaves increased, the peroxidase (POD) activity decreased, and the superoxide dismutase (SOD) activity did not show significant change ($P>0.05$). *B. tabaci* adults had a higher survival rate and deposited more eggs on the plants treated with IAA. The

基金项目：国家重点基础研究发展计划（"973"计划）项目（2012CB114105），农业部公益性行业专项——西北地区园艺作物粉虱类害虫发生动态及综合治理技术研究与示范（201303019）；国家大宗蔬菜岗位科学家项目（CARS-25）

作者简介：邱宁，女，1990 年生，河北保定人，博士研究生，研究方向为农业昆虫与害虫防治，E-mail：ninzier@163.com；张献忠，男，1963 年生，山东滨州人，从事农技推广工作，E-mail：zhxzh6@gmail.com

[#]同等贡献作者 Authors with equal contribution

[*]通讯作者 Corresponding author，E-mail：txliu@nwsuaf.edu.cn

收稿日期 Received：2014-01-22；接受日期 Accepted：2014-05-29

survival rate of *B. tabaci* adults and the total number of eggs laid were the greatest in the 50 mg/L IAA treatment, and the survival rate of *B. tabaci* adults was the lowest in the 250 mg/L IAA treatment. The alkaline phosphatase (AKP) and SOD activities were higher in the treatment groups than in the untreated controls.【Conclusion】After tomato plants are sprayed with different concentrations of IAA solution, the physiological and biochemical parameters of tomato change to different degrees, and the survival, oviposition and detoxification enzyme activities of whiteflies on the plants also change to one degree or another. Appropriate doses of IAA could facilitate better performance of whiteflies, by which we can provide more excellent substitutable hosts for breeding wasps.

Key words: *Bemisia tabaci* B type; indole-3-acetic acid (IAA); tomato; detoxification enzyme; survival rate; oviposition

植物生长调节物质能改变植物体内化合物组成、含量,进而改变植物的生长速率、颜色、花期、形态建成等(Auclair *et al*., 1957; Bangerth, 1985)。实践中,作为植物生长增效剂或延缓剂,植物生长调节物质成本低、见效快,在农业生产中使用广泛。植食性昆虫取食植物生长调节物质处理过的寄主植物后,往往会发生形态特征、生长发育、生存繁殖、活动规律等变化(Prado and Frank, 2013b)。例如,在蜡螟 *Achoria grisella* F. 的食物中加入不同浓度的植物生长调节剂吲哚-3-乙酸(indole-3-acetic acid, IAA),饲养出的蜡螟绒茧蜂 *Apanteles galleriae* Wilkinson 发育历期增加,成虫寿命变短(Uçkan *et al*., 2011a)。人工饲料中加入三十烷醇(triacontanol)、高浓度矮壮素(chlormequat chloride)或高浓度助壮素(mepiquat chloride)能降低尘污灯蛾 *Spilarctia obliqua* (Walker)幼虫存活率,加入赤霉素则能延长幼虫期(Gupta *et al*., 2009)。喷施人工合成的矮壮素(2 500 mg/L)(chlormequat chloride)能增加黑醋栗 *Ribes nigrum* L. 产量,同时降低其上的苦苣菜蚜 *Hyperomyzus lactucae* (L.)虫口密度(Singer and Smith, 1975)。赤霉酸(gibberelic acid)能降低地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Wied.)的繁殖率,并改变虫体卵巢蛋白组分和氨基酸丰度(Hussein, 2005)。

烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius)是热带、亚热带和温带地区为害严重的农业害虫。在过去的 30 年间,烟粉虱在除南极洲之外的各大洲出现并暴发成灾(Brown *et al*., 1995; Li *et al*., 2013)。烟粉虱的寄主植物已超过 600 种,包括蔬菜、谷物、纤维作物和多种观赏性植物(Zang and Liu, 2010)。它刺吸植物汁液造成寄主植物持续性生长受损,果实成熟不均,且分泌的蜜露黏着在叶片表面致使植物光合作用率下降,导致减产(Byrne *et al*., 1992)、品质受损。此外,烟粉虱还能传播多种植物病毒(Smith and Boyko, 2006; Oriani *et al*., 2011),如菜豆金黄花叶病毒属 *Begomoviruses* 病毒,引起棉花卷叶病和番茄黄化曲叶病等。

生物有机体受到外源物质的入侵时会诱导生物体内的防御反应,首先会引发生物体内的活性氧清除系统主要酶活性的变化。超氧化物歧化酶(SOD)能催化超氧阴离子歧化反应,使机体避免超氧化物损伤,是植食性昆虫和植物体内重要解毒酶(Gao *et al*., 2013)。碱性磷酸酶(AKP)在昆虫对植物次生代谢物的解毒代谢中有重要作用(陈巧云等,1980)。植物中多酚氧化酶(PPO)能催化氧分子氧化酚、多酚,形成醌,在植物抗逆和解毒代谢中有重要作用(Mayer, 2006);过氧化物酶(POD)可以铁卟啉为辅基,催化过氧化氢与酚类、胺类化合物反应,能消除过氧化氢、酚类和胺类毒性(Lagrimini, 1991)。实验中测定了番茄植物和烟粉虱体内生理生化指标的变化,以期从机理上探索烟粉虱生态学指标变化的原因。

目前,化学防治仍然是许多国家治理烟粉虱危害的主要手段。但是,烟粉虱对农药日益增长的抗性(Liu, 2004),使得人们不能仅仅依赖化学防治。更重要的是,化学合成的杀虫剂对环境和人类健康有不可估量的负面影响。所以,有效发掘并利用植物本身的抗性,采用对人类和环境无害的生物防治来综合治理烟粉虱迫在眉睫(陈学新,2010)。本实验研究了外源喷施吲哚-3-乙酸对番茄植株生长、生理水平的影响和 B 型烟粉虱对寄主植物变化的应对方式,探索利用植物生长调节物质对烟粉虱进行生态防治的可能性。同时探索植物生理指标的优化是否会促进 B 型烟粉虱的存活或繁殖,从而为以烟粉虱为替代寄主饲养寄生蜂的载体植物系统提供更加优质的寄主资源。

1 材料与方法

1.1 供试植物和虫源

1.1.1 供试植物:番茄品种为中蔬四号(陕西天福种业有限公司),以草炭(品式托普,丹麦):珍珠岩:蛭石 =2∶1∶1(m/m)为基质,于穴盘内育苗后,移栽至塑料花盆(9 cm ×9 cm ×10 cm)中,置于养虫笼(40 cm ×40 cm ×40 cm)中。选取 4 叶期长势一致的健康植株待用。

1.1.2 供试虫源:B 型烟粉虱为长期饲养种群(西北农林科技大学应用昆虫学重点实验室)。将番茄无虫苗放入烟粉虱番茄种群中产卵 48 h,取出番茄苗,移除成虫,放入干净养虫笼中(60 cm ×60 cm ×60 cm)。成虫羽化 48 h 后用吸虫管小心收集,饥饿 3 h 备用。供试材料均在 26 ±0.5℃(光照)/21 ±0.5℃(黑暗),光周期 16L∶8D,RH 70% ±5% 的温室中饲养。

1.2 番茄叶面积、含水量及光合色素含量测定

分别准确称取 IAA [生工生物工程(上海)股份有限公司],配制成 10, 50, 100, 150, 200, 250, 300 和 350 mg/L 溶液待用,用蒸馏水喷施作为对照组。使用喷雾塔(Potter Spray Tower; Burkard Mabnufacturing Co., Ltd., Rickmansworth, Herts, UK),喷液量 2 mL,压力 0.3 bar,沉降 30 s。施药后的番茄置于 40 cm ×40 cm ×40 cm 养虫笼中,每个浓度 3 个重复。取倒数第 3 和 4 片叶,蒸馏水洗净后用便携式叶面积仪(LI-3000)测定,每个处理 5 次重复。称取 1 g 叶片置于 60℃烘箱中烘至恒重,含水量 =(鲜重 - 干重)/鲜重 ×100%,每个处理重复 3 次。

称取上述干燥后叶片 0.2 g,剪碎后放入 50 mL 离心管中,加入 25 mL 96% 乙醇,Parafilm 膜封口后室温避光浸提至叶片变白。2 000 g 离心 10 min,上下震荡混匀后取上清 1.5 mL 加入 24 孔酶标板后用酶标仪(Tecan Infinite M_{200},帝肯,瑞士)测定。按下列公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素相对浓度(苏正淑和张宪政, 1989):

$$C_{叶绿素a} = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649};$$

$$C_{叶绿素b} = 24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665};$$

$$C_{叶绿素} = C_{叶绿素a} + C_{叶绿素b};$$

$$C_{类胡萝卜素} = (1\,000 \times A_{470} - 2.05 \times C_{叶绿素a} - 114.8 \times C_{叶绿素b})/245。$$

1.3 番茄总蛋白和解毒酶活性测定

酶液制备:将番茄叶片洗净擦干后称取 1 g,剪碎后迅速放入瓷研钵中用液氮研磨,粉末置于 10 mL 离心管中,加入 9 mL PBS (pH 7.4),4℃ 4 000 g 离心 15 min 后取上清液待测。为降低机械损伤对结果的影响,植物取样时皆每株只取 1 次。

总蛋白测定采用 Bradford 法;SOD 活性测定使用试剂盒(江苏省南京市建成生物工程研究所,A001-3,96T);PPO 活性测定时向 96 孔板中加入 10 μL 酶液、200 μL 20 mmol/L 邻苯二酚,测 3 min 内 ΔOD_{410};POD 活性测定时向 96 孔板中加入 10 μL 酶液、200 μL 10 mmol/L 愈创木酚(含终浓度 25 mmol/L H_2O_2)测 3 min 内 ΔOD_{470}。

1.4 烟粉虱存活率和总产卵量测定

IAA 处理番茄 1 d 后,每笼接入 50 头(雌雄各 25 头)烟粉虱,分别于接虫后 24, 48, 72, 96 和 120 h 记录成虫存活数。实验中确保植株不受其他病虫危害与机械损伤。接虫 120 h 后,吸出剩余烟粉虱,液氮速冻后置于 -80℃冰箱待用。剪取全部番茄叶片,在显微镜(SE_{2000}, 浙江省宁波市江南仪器厂)下统计产卵量。

1.5 烟粉虱总蛋白和解毒酶活性测定

酶液制备:在 1.5 mL 离心管中液氮研磨烟粉虱,按照 1 头 10 μL 的比例加入磷酸盐缓冲液(PBS, 0.8 g NaCl, 0.02 g KCl, 0.144 g Na_2HPO_4, 0.024 g KH_2PO_4 溶于 1 L ddH_2O 中,HCl 调 pH 至 7.4,高压蒸汽灭菌 30 min,4℃备用),4℃ 2 000 g 离心(High-Speed Refrigerated Centrifuge CR22GⅢ, Hitachi, Japan) 15 min,取上清液备用。

总蛋白测定采用 Bradford 法(Zor and Selinger, 1996),用牛血清白蛋白(BSA)标准溶液制作标准曲线,浓度梯度为 100, 150, 200, 250, 300 和 350 μg/mL。

AKP 和 SOD 活性测定使用试剂盒(江苏省南京市建成生物工程研究所,A059-2,A001-3)。

1.6 数据处理

采用单因素方差分析(ANOVA-Duncan 氏检验)对所得数据进行统计分析,相关性分析采用 Pearson 法(SPSS 17.0, Chicago, IL, USA)。

2 结果与分析

2.1 喷施不同浓度 IAA 溶液后番茄含水量、叶面积及叶绿素含量和类胡萝卜素含量的变化

喷施不同浓度 IAA 后番茄含水量、叶面积、叶绿素含量、类胡萝卜素含量变化如表1。与对照相

表 1　喷施不同浓度 IAA 溶液后番茄叶片含水量、叶面积、叶绿素含量、类胡萝卜素含量、总蛋白含量以及 SOD，PPO 和 POD 活性的变化

Table 1　Changes in water content, leaf area, chlorophyll content, carotenoid content, total protein content and activities of SOD, PPO and POD of *Solanum lycopersicum* after foliar spray of different concentrations of IAA

IAA 浓度 IAA concentration (mg/L)	含水量 Water content (%)	叶面积 Leaf area (cm^2)	叶绿素含量 Chlorophyll content (mol/L)	类胡萝卜素含量 Carotenoid content (mol/L)
0(CK)	0.7362 ±0.0241 b	8.516 ±0.2499 d	6.728 ±0.5480 b	0.9397 ±0.1926 b
10	0.7590 ±0.0241 ab	9.246 ±0.5038 cd	7.866 ±0.1457 a	1.4007 ±0.0703 a
50	0.7361 ±0.0225 b	9.428 ±0.1589 bcd	7.712 ±0.0606 a	1.293 ±0.1111 ab
100	0.8230 ±0.0157 a	9.398 ±0.3280 cd	7.674 ±0.2241 a	1.147 ±0.1484 ab
150	0.7831 ±0.0199 ab	9.786 ±0.4001 bcd	6.992 ±0.1750 ab	1.086 ±0.0950 ab
200	0.7652 ±0.0266 ab	10.288 ±0.3871 abc	7.030 ±0.2456 ab	1.120 ±0.0595 ab
250	0.8238 ±0.0133 a	11.146 ±0.4771 a	7.097 ±0.0302 ab	1.159 ±0.0609 ab
300	0.8105 ±0.0208 a	10.738 ±0.5509 ab	6.280 ±0.0690 b	1.008 ±0.0857 ab
350	0.8032 ±0.0277 ab	10.462 ±0.4991 abc	6.231 ±0.1708 b	1.210 ±0.0685 ab

IAA 浓度 IAA concentration (mg/L)	总蛋白含量 Total protein content (mg/mL)	SOD 活性 SOD activity (U/mg pro)	PPO 活性 PPO activity (ΔOD_{410}/min · mg pro)	POD 活性 POD activity (ΔOD_{470}/min · mg pro)
0(CK)	315.8 ±28.37 b	24.32 ±2.187 ab	0.1881 ±0.0222 c	3.368 ±0.2354 a
10	370.0 ±23.35 b	22.02 ±4.782 ab	0.4174 ±0.0665 a	3.147 ±0.2823 bc
50	341.8 ±3.572 b	16.02 ±3.913 b	0.3697 ±0.0259 ab	2.457 ±0.1510 bc
100	342.8 ±25.81 b	26.35 ±3.632 a	0.3050 ±0.0703 abc	2.343 ±0.1268 bc
150	363.4 ±24.86 b	23.64 ±2.442 ab	0.2698 ±0.0330 bc	2.001 ±0.2528 bc
200	674.4 ±21.48 a	25.03 ±0.808 ab	0.2383 ±0.0236 bc	2.111 ±0.1729 bc
250	716.9 ±22.24 a	28.63 ±0.842 a	0.3189 ±0.0211a bc	2.213 ±0.1855 bc
300	359.6 ±24.34 b	24.55 ±3.094 ab	0.2133 ±0.0323 c	1.823 ±0.0784 c
350	387.3 ±9.162 b	26.29 ±1.609 a	0.1864 ±0.0377c	2.475 ±0.1460 b

表中数据为平均数 ± 标准误；同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上有显著差异（ANOVA-Duncan 氏检验）；表 2 和 3 同。Data in the table are represented as means ± *SE*, and those followed by different letters in the same column are significantly different at the 0.05 level (ANOVA-Duncan's test). The same for Tables 2 and 3.

比，含水量略有上升，但无显著差异（$F=2.48$; $df=8,18$; $P=0.052$）；番茄叶面积升高（$F=4.057$; $df=8,36$; $P=0.002$），其中 250 mg/L 处理组叶面积最大。

喷施 IAA 后番茄叶绿素含量增加（$F=4.991$; $df=8,18$; $P=0.002$）。其中，喷施 10 mg/L（$P=0.008$），50 mg/L（$P=0.018$）和 100 mg/L（$P=0.022$）IAA 时番茄叶绿素含量显著增加。喷施 IAA 后类胡萝卜素含量升高，但各浓度处理间差异不显著（$F=1.263$; $df=8,18$; $P=0.321$）。

2.2　喷施不同浓度 IAA 后番茄解毒酶活性的变化

番茄总蛋白和解毒酶变化如表 1。喷施 200 mg/L 和 250 mg/L IAA 时番茄叶片中总蛋白含量显著升高（$F=48.704$; $df=8,18$; $P<0.0001$）。喷施 IAA 后 SOD 活性有增加的趋势，但是无显著差异（$F=1.508$; $df=8,18$; $P=0.223$），PPO 活性表现为升高的趋势（$F=3.917$; $df=8,18$; $P=0.008$）。喷施 IAA 使 POD 活性降低（$F=7.177$; $df=8,18$; $P<0.0001$），其中喷施 10 mg/L IAA 时在处理组中最高，为 3.147，300 mg/L 最低，为 1.823。

2.3　喷施不同浓度 IAA 后番茄上烟粉虱存活率、总产卵量及 AKP 和 SOD 活性的变化

接虫后 24 h，烟粉虱存活率无差异（$F=1.661$; $df=8,18$; $P=0.176$）；48 h 时，对照组存活率显著

低于实验组(F = 5.523; df = 8,18; P = 0.001),其中喷施 10 mg/L 和 50 mg/L IAA 显著高于其他浓度;72 h 后,50 mg/L 处理组存活率显著高于其他浓度(F = 12.407; df = 8,18; P < 0.0001)(表 2)。

喷施 IAA 使烟粉虱 120 h 总产卵量升高(F = 43.865; df = 8,18; P < 0.0001)(图 1)。其中,喷施 50 mg/L 的 IAA 时显著促进烟粉虱产卵(P < 0.0001),10 mg/L 和 300 mg/L 时也能促进烟粉虱产卵,但两者间差异不显著(P > 0.05),其他浓度间无显著性差异(P > 0.05)。

喷施 IAA 使烟粉虱可溶性总蛋白含量显著降低(F = 40.55; df = 8,18; P < 0.0001),AKP (F = 2.622; df = 8,18; P = 0.043)和 SOD (F = 17.420; df = 8,18; P < 0.0001)活性增加(表 3)。10 mg/L 和 50 mg/L IAA 处理组中,烟粉虱体内总蛋白含量显著高于其他浓度,而 AKP 和 SOD 活性低于其他浓度。

表 2 喷施不同浓度 IAA 溶液对番茄上烟粉虱成虫存活率(%)的影响

Table 2 Effects of foliar spray of different concentrations of IAA on survival rates (%) of *Bemisia tabaci* adults on *Solanum lycopersicum* plants

IAA 浓度(mg/L) IAA concentration	接虫后时间 Time after infestation (h) 24	48	72	96	120
0(CK)	86.7 ± 4.1 ab	65.3 ± 2.4 b	49.3 ± 4.4 e	38.7 ± 0.7 e	26.7 ± 4.1 e
10	94.7 ± 1.8 a	81.3 ± 1.3 a	62.7 ± 1.8 bc	58.0 ± 1.2 b	54.0 ± 2.0 b
50	93.3 ± 2.4 ab	84.7 ± 2.1 a	80.7 ± 2.9 a	75.3 ± 2.9 a	68.0 ± 6.1 a
100	87.3 ± 1.8 ab	72.7 ± 0.7 b	64.7 ± 2.4 b	55.3 ± 5.9 bc	50.0 ± 4.0 bc
150	88.7 ± 4.4 ab	70.7 ± 2.4 b	65.3 ± 1.3 b	52.0 ± 2.3 bcd	48.0 ± 2.3 bcd
200	88.7 ± 2.7 ab	70.0 ± 3.5 b	59.3 ± 0.7 bcd	50.7 ± 3.5 bcd	48.0 ± 4.2 bcd
250	84.0 ± 2.0 b	68.7 ± 2.7 b	50.7 ± 1.8 de	44.0 ± 2. 3 de	37.3 ± 1.8 d
300	89.3 ± 2.9 ab	70.7 ± 1.8 b	54.7 ± 4.8 cde	49.3 ± 2.9 bcd	42.7 ± 1.8 cd
350	84.7 ± 1.3 b	67.3 ± 4.8 b	55.3 ± 1.3 cde	46.0 ± 2.3 cde	39.3 ± 0.7 cd
F	1.661	5.523	12.407	12.014	11.745
df	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18
P	0.176	0.001	0	0	0

2.4 烟粉虱生存状况与番茄生理生化指标相关性分析

相关性分析结果表明,B 型烟粉虱成虫 120 h 存活率与番茄 SOD 活性显著负相关(R = −0.914, P < 0.001)。植物叶片含水量的变化与 B 型烟粉虱成虫 120 h 存活率成正相关(R = 0.997, P < 0.001)。总产卵量与番茄叶片叶绿素含量成正相关(R = 0.688, P < 0.05)。烟粉虱体内 AKP 活性与植物 SOD 活性显著相关(R = 0.805, P < 0.05),其体内 SOD 活性与番茄叶面积表现出正相关(R = 0.721, P < 0.05)。

3 讨论

一些植物生长调节物质能降低植食性昆虫的繁殖力和存活率,增加发育历期(Coffelt and Schultz, 1988; Gupta *et al.*, 2009),而另一些植物生长调节物质则能促进昆虫存活(Coffelt *et al.*, 1993)。本研究结果表明喷施 IAA 对番茄生长发育、形态建成有影响,但不同浓度影响不同。IAA 处理使番茄含水量、叶面积、叶绿素含量和类胡萝卜素含量升高,其中低浓度 IAA 显著促进苗期番茄叶绿素合成。喷施 IAA 后,番茄体内 PPO 活性升高,POD 活性降低。喷施 50 mg/L IAA 时烟粉虱的存活率、产卵量均高于其他处理;喷施 250 mg/L IAA 时,烟粉虱存活率低于其他处理组,且总产卵量处于较低水平。随着

表 3 喷施不同 IAA 浓度后番茄上烟粉虱总蛋白含量及 SOD 和 AKP 活性的变化

Table 3 Changes in total protein content, and SOD and AKP activities in *Bemisia tabaci* adults on *Solanum lycopersicum* plants after foliar spray of different concentrations of IAA

IAA 浓度 IAA concentration (mg/L)	总蛋白含量 Total protein content (mg/mL)	AKP 活性 AKP activity (U/g pro)	SOD 活性 SOD activity (U/mg pro)
0(CK)	687.9 ± 38.89 a	4.857 ± 0.6633 b	15.46 ± 0.722 d
10	646.4 ± 21.65 a	6.126 ± 1.779 ab	21.67 ± 1.552 cd
50	568.2 ± 24.53 b	7.329 ± 1.667 ab	23.33 ± 1.124 cd
100	388.5 ± 6.220 cd	10.244 ± 2.590 ab	29.67 ± 2.339 bc
150	425.7 ± 34.87 c	10.276 ± 0.7784 ab	29.47 ± 2.735 bc
200	344.8 ± 25.84 de	10.420 ± 3.723 ab	36.96 ± 2.470 ab
250	317.4 ± 17.85 de	9.630 ± 1.468 ab	40.36 ± 3.576 a
300	296.5 ± 13.70 e	9.920 ± 1.399 ab	42.24 ± 1.479 a
350	275.8 ± 19.95 e	11.89 ± 3.230 a	44.53 ± 3.851 a

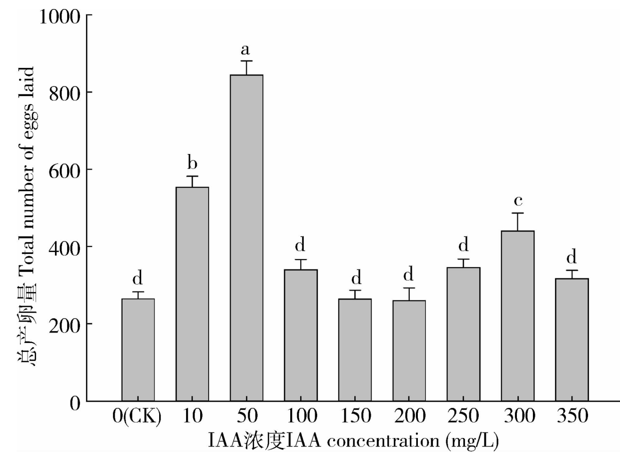


图 1　喷施不同浓度 IAA 对番茄上烟粉虱产卵量的影响

Fig. 1　Total number of eggs laid by female adults of *Bemisia tabaci* on *Solanum lycopersicum* plants after foliar spray of different concentrations of IAA

图中数据为平均数 ± 标准误；柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上有显著差异（ANOVA-Duncan 氏检验）。Data in the figure are represented as means ± *SE*, and different letters above bars indicate significant difference at $P<0.05$ (ANOVA-Duncan's test).

IAA 浓度增高，烟粉虱体内 AKP 和 SOD 活性表现为增高的趋势。喷施 IAA 后烟粉虱解毒酶活性升高可能与番茄体内的次生代谢物质升高有关（Harrewijn, 1978; Zhang *et al.*, 2014）。50 mg/L 处理组中，烟粉虱存活率、产卵量高，很大程度取决于此时番茄生长状况良好，且解毒酶（SOD, POD 与 PPO）活性较低；而 250 mg/L 处理组中，烟粉虱存活率最低，产卵量低，推测与此浓度处理组番茄体内 SOD, PPO 与 POD 活性处于较高水平有关。相关性分析的结果也说明番茄解毒酶 SOD 活性升高可能是造成烟粉虱存活率降低的原因之一。

其他研究表明，在特定条件下，植物生长调节物质对植物、昆虫有不同程度的影响。例如，灌根或喷施吲哚丁酸（IBA）、绿原酸（chlorogenic acid）、赤霉素（GA_3）、N-二甲胺基琥珀酸（Alar B-9）均能降低萝卜蚜 *Lipaphis erysimi*（Kaltenbach）2 龄若虫体内碳水化合物含量，而马来酰肼（maleic hydrazide）能提高虫体碳水化合物含量（Rup *et al.*, 2000）。烯效唑（uniconazole）和多效唑（pachlobutrazole）能抑制亚热带黏虫 *Spodoptera eridania*（Cramer）中肠细胞色素 P450 基因表达（Brattsten *et al.*, 1994）。高浓度多效唑能降低柳栎 *Quercus phellos* L. 上橙纹犀额蛾 *Anisota senatoria*（J. E. Smith）低龄幼虫存活率并减缓其发育，低浓度多效唑能提高高龄幼虫存活率并增加蛹重（Coffelt, 1993）。乙烯（ethylene）处理蚕豆 *Vicia faba* L. 后其上黑豆蚜 *Aphis fabae* Scopoli 色素含量减半，体色变白，且在个体生活史中持续表现，变色后的 1 龄若虫转移到正常蚕豆上体色不能改善（Honeyborne and van Emden, 1976）。

本实验中，番茄苗外源喷施 IAA 后，含水量略有上升，叶绿素含量增加，叶面积增大，生活在其上的烟粉虱存活率升高，总产卵量升高，解毒酶活性升高，表明 IAA 能通过影响番茄的营养状况、次生代谢物质、形态构建等方面影响烟粉虱的生存。但不同浓度 IAA 影响不同，其中，喷施 50 mg/L IAA 最有利于烟粉虱存活，250 mg/L IAA 既能促进番茄苗期生长又能在一定程度上抑制烟粉虱危害。因而，在生产实践中，施用 IAA 时应考虑浓度以免使用不当引起烟粉虱严重发生为害。

此外，传统化学防治弊端日益凸显，人们日益重视对人畜、环境友好的生物防治，但越来越多的研究发现盲目使用植物生长调节物质会影响植物-害虫-天敌三级营养关系，尤其很可能会削弱寄生蜂释放后发挥的效力。如，大蜡螟 *Galleria mellonella*（L.）食物中的赤霉酸浓度大于 200 mg/L 时，以其饲养的卷蛾黑瘤姬蜂 *Pimpla turionellae*（L.）成虫体长减小（Uçkan *et al.*, 2011b）；黑珍珠胡椒 *Capsicum annuum* L. 上喷施多效唑后对桃蚜 *Myzus persicae*（Sulzer）丰富度没有显著影响，但使科列马·阿布拉小蜂 *Aphidius colemani* Viereck 形成的僵蚜数目减少，羽化率降低，雄性成蜂比例变大且个体变大，雌性成蜂比例变小且个体变小（Prado and Frank, 2013a）。所以，在生产实践中，植物生长调节物质的不合理施用不仅可能给害虫的繁衍带来有利条件，也可能对害虫天敌造成潜在的威胁。为最大程度发挥生物防治的作用，需进一步探究植物生长调节物质对 B 型烟粉虱天敌的影响，从而为以烟粉虱为替代寄主饲养寄生蜂的载体植物系统提供更加优质的寄主和天敌资源。

参考文献（References）

Auclair JL, Maltais JB, Cartier JJ, 1957. Factors in resistance of peas to the pea aphid, *Acyrthosiphon pisum* (Harr.) (Hemiptera: Aphididae). II. Amino acids. *The Canadian Entomologist*, 89: 457–464.

Bangerth F, Aufhammer W, Baum O, 1985. IAA level and dry matter accumulation at different positions within a wheat ear. *Physiologia Plantarum*, 63: 121–125.

Brattsten LB, Berger DA, Dungan LB, 1994. *In vitro* inhibition of

midgut microsomal P450s from *Spodoptera eridania* caterpillars by demethylation inhibitor fungicides and plant growth regulators. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 48: 234 – 243.

Brown JK, Frohlich DR, Rosell RC, 1995. The sweetpotato or silverleaf whiteflies: biotypes of *Bemisia tabaci* or a species complex? *Annual Review of Entomology*, 40: 511 – 534.

Bruessow F, Gouhier C, Buchala A, Metraux JP, Reymond P, 2010. Insect eggs suppress plant defence against chewing herbivores. *The Plant Journal*, 62: 876 – 885.

Byrne DN, Bellows TS, Culotta E, 1992. 'Superbug' evidence. *Science*, 255(5050): 1335.

Chen QY, Jiang JL, Lin GF, Liu WD, 1980. Studies on the resistance of dipterex-resistant mosquito *Culex pipiens pallens* Coq. – on the relationship between hydrolase and resistance. *Acta Entomologica Sinica*, 23: 350 – 357. [陈巧云, 姜家良, 林国芳, 刘维德, 1980. 淡色库蚊对敌百虫抗性的研究——水解酶同敌百虫抗性关系. 昆虫学报, 23: 350 – 357]

Chen XX, 2010. Recent progress, existing problems and prospects in biological control of insect pests in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47: 615 – 625. [陈学新, 2010. 21 世纪我国害虫生物防治研究的进展、问题与展望. 昆虫知识, 47: 615 – 625]

Coffelt MA, Schultz PB, 1988. Influence of plant growth regulators on the development of the azalea lace bug (Hemiptera: Tingidae). *Journal of Economic Entomology*, 81: 290 – 292.

Coffelt MA, Schultz PB, Banko TJ, 1993. Tree growth regulator influences orange striped oakworm (Lepidoptera: Saturniidae) development and survival. *Journal of Economic Entomology*, 86: 1446 – 1452.

Gao XL, Li JM, Wang YL, Jiu M, Yan GH, Liu SS, Wan XW, 2013. Cloning, expression and characterization of mitochondrial manganese superoxide dismutase from the whitefly, *Bemisia tabaci*. *International Journal of Molecular Sciences*, 14: 871 – 887.

Gupta G, Yadav SR, Bhattacharya AK, 2009. Influence of synthetic plant growth substances on the survivorship and developmental parameters of *Spilarctia obliqua* Walker (Lepidoptera: Arctiidae). *Journal of Pest Science*, 82: 41 – 46.

Harrewijn P, 1978. The role of plant substances in polymorphism of the aphid *Myzus persicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 24: 398 – 414.

Honeyborne CHB, van Emden HF, 1976. Pale coloration in *Aphis fabae* reared on beans treated with the plant growth regulator, ethylene-*bis*-nitrourethane. *Journal of Entomology Series A, General Entomology*, 50: 157 – 160.

Hussein KT, 2005. Suppressive effects of *Calendula micrantha* essential oil and gibberelic acid (PGR) on reproductive potential of the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Tephritidae). *Journal of the Egyptian Society of Parasitology*, 35: 365 – 377.

Lagrimini LM, 1991. Wound-induced deposition of polyphenols in transgenic plants overexpressing peroxidase. *Plant Physiology*, 96: 577 – 583

Li SJ, Xue X, Ren SX, Cuthbertson AGS, van Dam NM, Qiu BL, 2013. Root and shoot jasmonic acid induced plants differently affect the performance of *Bemisia tabaci* and its parasitoid *Encarsia formosa*. *Basic and Applied Ecology*, 14: 670 – 679.

Liu TX, 2004. Toxicity and efficacy of spiromesifen, a tetronic acid insecticide, against sweetpotato whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae) on melons and collards. *Crop Protection*, 23: 505 – 513.

Mayer AM, 2006. Polyphenol oxidases in plants and fungi: going places? A review. *Phytochemistry*, 67: 2318 – 2331.

Oriani MA, Vendramim JD, Vasconcelos CJ, 2011. Biology of *Bemisia tabaci* (Genn.) B biotype (Hemiptera, Aleyrodidae) on tomato genotypes. *Scientia Agricola*, 68: 37 – 41.

Prado SG, Frank SD, 2013a. Compact plants reduce biological control of *Myzus persicae* by *Aphidius colemani*. *Biological Control*, 65: 184 – 189.

Prado SG, Frank SD, 2013b. Tritrophic effects of plant growth regulators in an aphid-parasitoid system. *Biological Control*, 66: 72 – 76.

Rup PJ, Sohal SK, Sohi R, Kaur G, Sandhu N, Gurm SK, Wadhwa SK, 2000. Influence of PGRs on carbohydrate content in *Lipaphis erysimi* (Kalt.). *Indian Journal of Experimental Biology*, 38: 1066 – 1068.

Singer M, Smith B, 1975. Use of the plant growth regulator chlormequat chloride to control the aphid *Hyperomyzus lactucae* on black currants. *Annals of Applied Biology*, 82: 407 – 414.

Smith CM, Boyko EV, 2006. The molecular bases of plant resistance and defense responses to aphid feeding: current status. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 122: 1 – 16.

Su ZS, Zhang XZ, 1989. Several kinds of determination methods of plant chlorophyll content. *Plant Physiology Communications*, 25(5): 77 – 78. [苏正淑, 张宪政, 1989. 几种测定植物叶绿素含量的方法比较. 植物生理学通讯, 25(5): 77 – 78]

Uçkan F, Haftaci İ, Ergin E, 2011a. Effects of indol-3-acetic acid on biological parameters of the larval endoparasitoid *Apanteles galleriae* (Hymenoptera: Braconidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 104(1): 77 – 82.

Uçkan F, Öztürk Z, Altuntaş H, Ergin E, 2011b. Effects of gibberellic acid (GA_3) on biological parameters and hemolymph metabolites of the pupal endoparasitoid *Pimpla turionellae* (Hymenoptera: Ichneumonidae) and its host *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of the Entomological Research Society*, 13(3): 1 – 14.

Zang LS, Liu TX, 2010. Effects of food deprivation on host feeding and parasitism of whitefly parasitoids. *Environmental Entomology*, 39: 912 – 918.

Zhang K, Di N, James RS, Zhang BW, Tan XL, Cao HH, Liu YH, Liu TX, 2014. Does a multi-plant diet benefit a polyphagous herbivore? A case study with *Bemisia tabaci*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 152: 148 – 156.

Zor T, Selinger Z, 1996. Linearization of the Bradford protein assay increases its sensitivity: theoretical and experimental studies. *Analytical Biochemistry*, 236: 302 – 308.

(责任编辑: 袁德成)